Выбор допустимых рабочих напряженностей в силовых конденсаторах с пропиткой экологически безопасными диэлектриками

КУЧИНСКИЙ Г.С., ГАЛАХОВА Л.Н.

В результате исследования основных электрофизических характеристик экологически безопасных жидких диэлектриков установлены наиболее рациональные жидкости для пропитки изоляции силовых конденсаторов. На основании исследования характеристик частичных разрядов и ресурсных испытаний определены допустимые рабочие напряженности. Полученные результаты исследований использованы для разработки отечественных силовых конденсаторов с пропиткой экологически безопасными жидкостями.

Ключевые слова: *силовые конденсаторы, жидкие диэлектрики, экологическая безопасность, рабочие напряженности, расчет*

On the basis an investigation of main electrophysical characteristics of ecology safe liquid dielectrics the most efficient liquids for impregnating power capacitors are determined. On the basis the investigation of characteristics of partial discharges and service life tests the allowable operating strengths are determined. The results of investigations have been used for designing home power capacitors impregnated with ecology safe liquids.

Key words: *power capacitors, liquid dielectrics, ecology safety, operating strengths, calculation*

Выпускаемые до 1980 г. силовые конденсаторы для компенсации реактивной мощности в электроустановках выполнялись с бумажно-пленочной изоляцией, пропитанной трихлордифенилом, и благодаря повышенной стабильности трихлордифенила в электрическом поле имели весьма высокие удельные характеристики. Однако вследствие экологической опасности трихлордифенила возникла необходимость его замены на другие диэлектрические пропитывающие жидкости. В настоящей работе исследовались следующие экологические безопасные заменители трихлордифенила: фенилксилилэтан японского производства ($\varepsilon/\varepsilon_0=2{,}65$), жарилек С101 (монодибензилтолуол, $\varepsilon/\varepsilon_0=2{,}65$) и миксофлекс 1000 (диоктилфталат, $\varepsilon/\varepsilon_0=5{,}3$) французского производства, отечественной ДОН-3 (монодибензилтолуол, $\varepsilon/\varepsilon_0=2{,}64$).

Исследование стабильности этих жидкостей позволило установить следующее. По повышению термической стабильности пропитывающие жидкости располагаются в следующем порядке: миксофлекс 1000 (наименьшая стабильность), ДОН-3, фенилксилилэтан, жарилек С101; в условиях одновременного воздействия электрического поля и температуры жарилек С101 также имеет большую стабильность по сравнению с другими жидкостями. Жидкости ДОН-3, фенилксилилэтан, жарилек С101 являются наиболее газостойкими в электрическом поле; более низкой газостойкостью обладает миксофлекс 1000.

Исследования бумажно-пленочного и пленочного диэлектриков проводились с использованием полипропиленовой пленки. Кратковременная электрическая прочность исследовалась на секциях конденсаторов с большой площадью электродов (алюминиевой фольги), равной 2,5 м^2. Толщина диэлектрика при этом изменялась от 16 до 60 мкм. Результаты исследования бумажно-пленочной и пленочной изоляции показали, что наибольшей прочностью обладает пленочной диэлектрик с пропиткой фенилксилилэтаном. При толщине диэлектрика $d_c=30$ мкм среднее значение пробивной напряженности $E_{\text{пр.ср}}=245$ кВ/мм при весьма малом разбросе значений — коэффициент вариации $\sigma^*=2{,}4\%$. Преимущество пленочного диэлектрика по сравнению с бумажно-пленочным и особенно бумажным реализуется наиболее ощутимо при малых толщинах (20÷30 мкм), см. рис. 1.

Исследования механизма разрушения конденсаторной изоляции, пропитанной жидким диэлектриком, выявили следующее: анализ ИК-спектров отечественной и зарубежной полипропиленовой пленки показал, что обе пленки имеют идентичную химическую и молекулярную структуры и сопоставимую кратковременную элект-

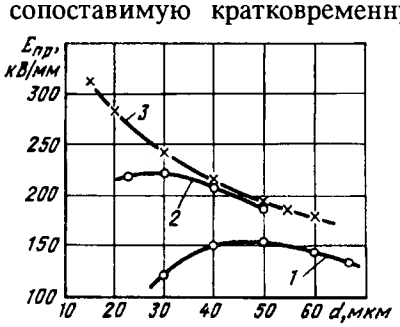

Рис. 1. Зависимость пробивной напряженности от толщины изоляции секций, площадь электродов 2500 см^2: *1* — конденсаторная бумага; *2* — бумажно-полипропиленовая изоляция, 67% пленки; *3* — полипропиленовая изоляция (пропитка фенилксилилэтаном)

рическую прочность при испытании в воздушной среде. Кратковременная электрическая прочность полипропиленовых пленок снижается с увеличением времени контактирования с пропитывающей жидкостью; взаимодействие жидкости с пленкой в процессе термостарения приводит к увеличению диэлектрических потерь пропитывающей жидкости. Пленка французской фирмы Боллоре практически не влияет на диэлектрические потери пропитывающего состава. В то же время влияние отечественной и финской пленок существенно: увеличение диэлектрических потерь пропитывающей жидкости фенилксилилэтана из конденсаторов в процессе ресурсных испытаний тем значительнее, чем выше значение испытательной напряженности электрического поля в диэлектрике конденсатора.

Основным фактором, определяющим увеличение диэлектрических потерь пропитывающей жидкости, является электропроводность, что подтверждается линейным характером зависимости $\ln \operatorname{tg}\delta = f(1/T)$ в исследованном диапазоне температур. Хроматографический анализ фенилксилилэтана, взятого из конденсаторов, прошедших различную длительность ресурсных испытаний, показал рост концентрации водорода по мере старения изоляции. Этот рост свидетельствует о происходящих процессах разложения молекул жидкого диэлектрика — разрывах связей С—Н и образовании газообразных продуктов.

Анализ результатов показывает их противоречивость. С одной стороны, не было выявлено влияния напряженности электрического поля на процессы старения. С другой стороны, отмечается существенное влияние напряженности электрического поля на тангенс угла диэлектрических потерь пропитывающей жидкости, взятой из конденсаторов в процессе ресурсных испытаний, которые проводились при напряженностях $40 \div 50$ кВ/мм. При этих напряженностях не были зарегистрированы частичные разряды (ЧР) на уровне 10^{-12} Кл. Можно было предположить, что процессы старения при $E = 40 \div 50$ кВ/мм происходят вследствие ЧР значительно меньшей интенсивности на уровне $10^{-14} \div 10^{-13}$ Кл.

Исследования характеристик ЧР показали, что наибольшие значения критических ЧР имеет пленочный диэлектрик с пропиткой фенилксилилэтаном. Зависимости напряженности критических ЧР от толщины диэлектрика (в миллиметрах) имеют вид

$$E_{кр} = Ad^{-0,58} \text{ кВ/мм}, \qquad (1)$$

где коэффициент A равен: для бумажного диэлектрика с пропиткой трихлордифенилом — 11; с пропиткой миксофлексом — 8,0; для бумажно-пленочного диэлектрика с пропиткой миксофлексом 1000 — 10,2, трихлордифенилом — 11,9, фенилксилилэтаном — 14,9; для пленочной изоляции с пропиткой фенилксилилэтаном с незагнутыми краями обкладок — 14,9, с загнутыми краями обкладок — 16,4. Полученные зависимости изображены на рис. 2.

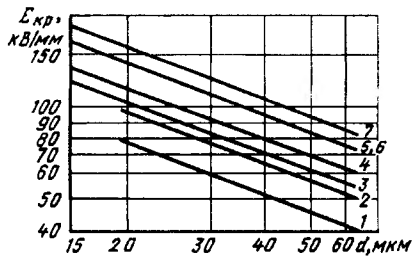

Рис. 2. Зависимость напряженности критических ЧР от толщины изоляции секций. Бумажный диэлектрик, пропитка миксофлексом (*1*), трихлордифенилом (*2*); бумажно-пленочный диэлектрик, пропитка миксофлексом 1000 (*3*); трихлордифенилом (*4*); фенилксилилэтаном (*5*). Пленочный диэлектрик, пропитка фенилксилилэтаном, незагнутые края обкладок (*6*); то же, загнутые края обкладок (*7*)

Для выявления возможности развития процессов старения при напряженностях, близких к рабочим вследствие частичных разрядов на уровне $10^{-14} \div 10^{-13}$ Кл, были поставлены специальные исследования с их регистрацией с помощью фотоэлектронного умножителя. Эти исследования показали, что на рабочем напряжении в изоляции силовых конденсаторов отсутствуют ЧР на уровне 10^{-12} Кл, т.е. отсутствуют ЧР, регистрируемые с помощью обычной электрической схемы регистрации. В то же время в конденсаторах может иметь место старение изоляции под воздействием слабых ЧР на уровне 10^{-14} Кл. Исследования проводились на образцах конденсаторной изоляции малой емкости и на моделях секций*. Была исследована изоляция на основе конденсаторной бумаги, пропитанной конденсаторным маслом, и полипропиленовой пленки, пропитанной заменителями трихлордифенила.

Исследования показали, что напряжение начальных ЧР на уровне 10^{-13} Кл определяется в основном диэлектрической проницаемостью изоляции, которая зависит от диэлектрической проницаемости пропитывающего состава. При этом с увеличением диэлектрической проницаемости наблюдается рост напряжения начальных частичных разрядов $U_н$. Зависимость напряженности начальных частичных разрядов $E_н$, кВ/мм, от толщины диэлектрика, мм, при плавном подъеме напряжения может быть представлена формулой

* **Кучинский Г.С., Пильщиков В.Е., Чуракова Н.А., Галахова Л.Н.** Характеристики частичных разрядов в силовых конденсаторах промышленной частоты с пленочной полипропиленовой изоляцией, пропитанной экологически безопасными жидкими диэлектриками. — Высоковольтная электроэнергетика и электрофизика. Тр. ЛГТУ, 1991, № 439.

$$E_н = Ad^{-0,5}, \qquad (2)$$

где значения коэффициента A приведены ниже:

Тип изоляции	Пропитка	A
Конденсаторная бумага	Нефтяное масло	3,6
Полипропиленовая пленка	Нефтяное масло	4,9
Полипропиленовая пленка	Фенилксилилэтан	5,2
Полипропиленовая пленка	Миксофлекс 1000	7,1

При исследовании зависимости $E_н$ от толщины диэлектрика установлено, что значения напряженности начальных ЧР в пропитанной пленочной изоляции имеют большой статистический разброс, значительно превышающий разброс этих значений для бумажной изоляции, пропитанной конденсаторным маслом. Установлено также, что в процессе выдержки под напряжением в пленочной изоляции с пропиткой газостойкими жидкостями происходит сильное затухание ЧР: уменьшаются кажущийся разряд ЧР и число ЧР в секунду.

Предварительное воздействие переменного напряжения на пропитанную пленочную изоляцию в 1,5—2 раза превышает напряженность начальных ЧР $E_н$. Напряжение начальных ЧР повышается, если край фольги загнут; однако после выдержки под напряжением эффекта от применения загнутого края фольги практически не наблюдается.

В связи с особенностью развития ЧР в пленочной изоляции были проведены опыты по исследованию тока ЧР $I_{чр}$ при ступенчатом подъеме напряжения с выдержкой на каждой ступени по 30 мин. Подъем напряжения производился до возникновения критических ЧР. Были построены обобщающие кривые тока $I_{чр}$ и кажущегося заряда $q_{чр}$ от напряженности E по наибольшим значениям для каждой ступени в конце выдержки. Характер зависимостей, полученных с помощью электрической схемы регистрации и при регистрации с помощью ФЭУ, для $q_{чр}$ приведен на рис. 3. Подобные зависимости имеют место для

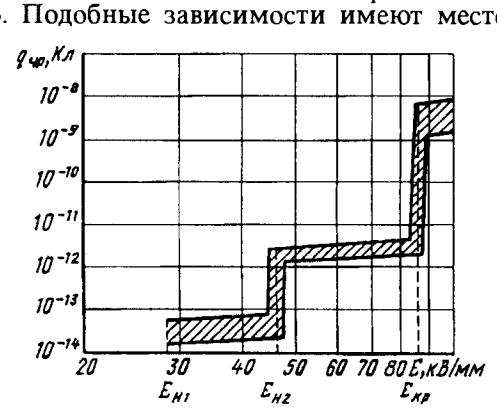

Рис. 3. Характер зависимости кажущегося заряда $q_{чр}$ от напряженности E, $d = 45$ мкм, полипропиленовая пленка, пропитка фенилксилилэтаном

изоляции, пропитанной газостойкими жидкостями. Для них наблюдаются два уровня (две ступени) резкого повышения кажущегося заряда $q_{чр}$ и тока $I_{чр}$ ЧР: первая ступень — до уровня $q_{чр} = = 10^{-12}$ Кл, вторая — до уровня $q_{чр} = 10^{-9} \div \div 10^{-8}$ Кл и выше. Напряженность второй ступени соответствует напряженности критических ЧР, полученных на секциях конденсаторов с помощью электрической схемы регистрации при чувствительности на уровне $(2 \div 5)10^{-11}$ Кл.

Значительный объем исследований был посвящен длительной электрической прочности конденсаторной изоляции на основе ресурсных испытаний конденсаторов; длительным испытаниям подвергались реальные конденсаторы, изготовленные с изоляцией из конденсаторной бумаги, с пропиткой миксофлексом 1000, бумажно-пленочные конденсаторы с пропиткой фенилксилилэтаном, жидкостями ДОН-3 и жарилек С101.

В связи с тем, что в процессе длительных испытаний при различных напряженностях электрического поля в конденсаторах устанавливалась разная температура, результаты испытаний приводились к одинаковой температуре. Пересчет наработок от одной температуры в наиболее нагретой точке конденсатора к другой производился по формуле

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \exp\left[B_т\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \qquad (3)$$

или

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \exp\left[\alpha_т(t_1 - t_2)\right], \qquad (4)$$

где τ_1 — наработка конденсатора при температуре T_1 (или t_1); τ_2 — наработка конденсатора при температуре T_2 (или t_2); T_1 и T_2 — температура в изоляции секций конденсатора, К; t_1 и t_2 — то же, °С; $B_т = W_a/(kT)$; W_a — энергия активации; k — постоянная Больцмана; $\alpha_т$ — температурный коэффициент, при котором в определенном диапазоне температур результаты расчетов по формулам (3) и (4) практически совпадают.

Испытуемые конденсаторы разбивались на группы, и каждая группа испытывалась на своем уровне испытательного напряжения. Уровень испытательного напряжения выбирался так, чтобы испытательная напряженность изоляции секций конденсатора не превышала напряженности критических ЧР, а температура изоляции не превышала предельно допустимой величины. В результате испытаний определялось время работы конденсатора до отказа. За отказ принимался пробой одной из секций конденсатора. По результатам испытаний для каждого типа конденсатора и для каждой испытательной напряжен-

ности строились функции распределения ресурса (время наработки до отказа) испытуемых конденсаторов.

Как показали результаты испытаний, функции распределения ресурса хорошо соответствуют вейбулловскому закону распределения

$$F(\tau) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\tau}{\tau_{0,63}}\right)^{\alpha}\right], \qquad (5)$$

где $\tau_{0,63}$ — ресурс, соответствующий вероятности $F(\tau)=0,63$; α — параметр разброса.

При этом пересчет наработок от одного режима испытания при напряженности E_1 и температуре изоляции T_1 к другому режиму при напряженности E_2 и температуре изоляции T_2 может быть произведен по формуле

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^n \exp\left[B_T\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right] \qquad (6)$$

или

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^n \exp\left[\alpha_T(t_1 - t_2)\right], \qquad (7)$$

где τ_1 — наработка конденсатора при напряженности E_1 и температуре T_1; τ_2 — наработка конденсатора при испытательной напряженности E_2 и температуре T_2; n — показатель степени, который определяется по результатам ресурсных испытаний.

Результаты определения параметра α для полученных экспериментальных функций распределения ресурса испытанных конденсаторов приведены в таблице. В качестве примера на рис. 4 приведены функции распределения ресурса бумажно-пленочных конденсаторов с пропиткой жарилек С101, построенные в вейбулловской системе координат.

Значения параметров разброса α в вейбулловской функции распределения [см. формулу (5)] и показателя степени n [см. формулы (6), (7)]

Тип изоляции	Испытательная напряженность, кВ/мм		Параметр разброса		Показатель степени n
	E_1	E_2	α_1	α_2	
Бумажная с пропиткой миксофлексом	33,0	27,0	3,1	2,9	12
Бумажно-пленочная с пропиткой фенилксилилэтаном	68,0	63,0	2,8	2,7	11
Бумажно-пленочная с пропиткой ДОН-3	70,0	61,5	1,6	1,7	14,5
Бумажно-пленочная с пропиткой жарилек С101	63,0	57,5	1,25	1,3	16,5

Из полученных результатов ускоренных испытаний конденсаторов были определены значения показателя степени n в формулах (6), (7) для зависимости ресурса от напряженности электрического поля. Значения n для конденсаторов с различными типами изоляции также приведены в таблице.

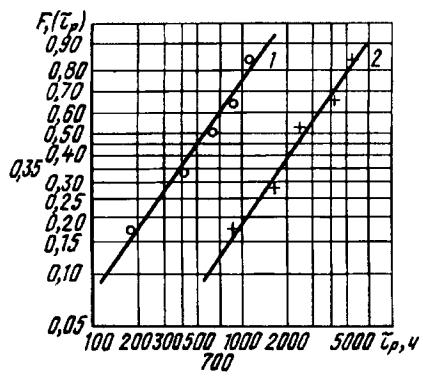

Рис. 4. Функции распределения ресурса бумажно-пленочных конденсаторов с пропиткой жарилек С101. Толщина диэлектрика 35 мкм, испытательная напряженность: *1* — 63 кВ/мм; *2* — 49 кВ/мм

Из приведенной таблицы следует, что параметры разброса для каждого типа изоляции слабо изменяются при изменении испытательной напряженности электрического поля. Наибольший разброс ресурса имеет место для бумажно-пленочной изоляции, пропитанной жарилек С101. Несколько меньший, но тоже значительный разброс ресурса возникает у конденсаторов с пропиткой ДОН-3. Наименьший разброс имеет место у конденсаторов с бумажно-пленочной изоляцией с пропиткой фенилксилилэтаном и у бумажных с пропиткой миксофлексом 1000. Очевидно, что для уменьшения разброса ресурса необходимо совершенствовать технологию изготовления конденсаторов с пропиткой жидкостями ДОН-3 и жарилек С101.

Как следует из этой же таблицы, для бумажно-пленочной изоляции наибольшее значение показателя степени n, т.е. наиболее сильная зависимость ресурса от напряженности электрического поля, имеет место для изоляции, пропитанной жидкостями ДОН-3 и жарилек С101. Этот приводит к тому, что, несмотря на больший статистический разброс ресурса испытуемых конденсаторов, допустимые рабочие напряженности при заданном ресурсе и надежности оказываются наибольшими для жидкостей ДОН-3 и жарилек С101.

На основании результатов исследований кратковременной электрической прочности, характеристик ЧР на уровне 10^{-12} Кл, а также на уровне $10^{-14} \div 10^{-13}$ Кл и по результатам ресурсных испытаний были определены допустимые рабочие напряженности $E_{раб}$ в изоляции конденсаторов промышленной частоты с пропиткой экологически безопасными заменителями трихлордифенила. При этом были учтены следующие требования к изоляции секций:

иметь достаточную кратковременную электрическую прочность (пробивную напряженность) при воздействии перенапряжений, возникающих на конденсаторе в процессе эксплуатации;

иметь установленный ресурс при заданной надежности при длительном воздействии рабочего напряжения;

выдерживать без ухудшения изоляционных свойств установленное испытательное напряжение;

потери в конденсаторе не должны превосходить определенного значения, при котором обеспечивается достаточный отвод тепла и температура наиболее нагретой области конденсатора не превышает допустимых значений.

При этом был учтен опыт создания и эксплуатации конденсаторов данного типа.

Для удовлетворения приведенных выше требований при выборе допустимых рабочих напряженностей $E_{раб}$ по характеристикам ЧР целесообразно исходить из следующих соображений;

1) при испытательном напряжении $U_{исп} = 2{,}15U_{ном}$ не должны возникать критические ЧР:

$$E_{раб} < E_{кр}/2{,}15; \qquad (8)$$

2) значение рабочей напряженности должно быть меньше первого резкого возрастания тока ЧР на уровне 10^{-12} Кл, т.е. напряженности ЧР второго рода $E_{н2}$:

$$E_{раб} \leq E_{н2}. \qquad (9)$$

С учетом перечисленных выше соображений были установлены допустимые рабочие напряженности $E_{раб}$, которые были определены из расчета ресурса конденсатора 20 лет при вероятности безотказной работы 0,9. При этом зависимости допустимых рабочих напряженностей $E_{раб}$ от толщины, мм, имеют вид:

$$E_{раб} = Ad^{-0{,}5}, \text{ кВ/мм}, \qquad (10)$$

где коэффициент A для пленочной изоляции равен: при пропитке конденсаторным маслом — 6,1, миксофлексом 1000 — 7,4, фенилксилилэтаном — 8,9; для бумажно-пленочной изоляции (67% пленки) при пропитке миксофлексом 1000 — 5,1, фенилксилилэтаном — 7,2, жарилек С101 и ДОН-3 — 7,7.

Эти зависимости для изоляции из полипропиленовой пленки изображены на рис. 5,*а*, а для бумажно-пленочной изоляции — на рис. 5,*б*. Полученные зависимости приводят к следующим значениям допустимых рабочих напряженностей для некоторых конкретных частных случаев: для бумажной изоляции с пропиткой миксофлексом 1000 при толщине $d=68$ мкм — $E_{раб}=19{,}5$ кВ/мм; для бумажно-пленочной изоляции с пропиткой фенилксилилэтаном при $d=30\div35$ мкм — $E_{раб}=40\div42$ кВ/мм, с пропиткой ДОН-3 или жарилек С101 — $E_{раб}=43\div45$ кВ/мм; для пленочного диэлектрика на основе полипропиленовой пленки с пропиткой фенилксилилэтаном при $d=30\div35$ мкм значение $E_{раб}=49\div51$ кВ/мм.

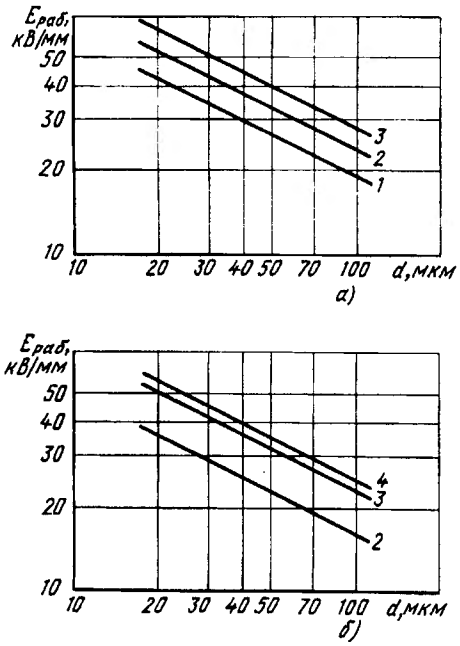

Рис. 5. Зависимости допустимой рабочей напряженности $E_{раб}$ от толщины изоляции из полипропиленовой пленки (*а*) и для бумажно-пленочной изоляции (*б*). Пропитка: *1* — конденсаторным маслом; *2* — миксофлексом 1000; *3* — фенилксилилэтаном; *4* — жарилек С101 или ДОН-3

По результатам исследования наиболее рациональной пропитывающей жидкостью для бумажно-пленочных конденсаторов на напряжения до 1 кВ является миксофлекс 1000, для бумажно-пленочных и пленочных конденсаторов на напряжения 1 кВ и выше целесообразно применять фенилксилилэтан, жарилек С101 или ДОН-3.

На основе полученных данных были разработаны бумажно-пленочные конденсаторы с пропиткой экологически безопасными жидкостями, которые имеют удельные характеристики на уровне лучших зарубежных аналогов. Конденсаторы испытаны на соответствие действующей нормативно-технической документации. Изготовление разработанных конденсаторов внедрено на конденсаторных заводах России и Казахстана.

Выводы. 1. По повышению термической стабильности пропитывающие жидкости располагаются в следующем порядке: миксофлекс 1000 (наименьшая стабильность), ДОН-3, фенилксилилэтан, жарилек С101; в условиях одновремен-

ного воздействия электрического поля и температуры жарилек С101 более стабилен по сравнению с фенилксилилэтаном. Жидкости ДОН-3, фенилксилилэтан, жарилек С101 оцениваются как наиболее газостойкие; низкой газостойкостью обладает миксофлекс 1000.

2. Наибольшие значения напряженности критических ЧР имеет пленочный (полипропиленовый) диэлектрик с пропиткой фенилксилилэтаном. В процессе выдержки под напряжением в пленочной изоляции происходит сильное затухание ЧР.

3. При ЧР на уровне $10^{-14} \div 10^{-13}$ Кл для изоляции, пропитанной газостойкими жидкими диэлектриками, наблюдаются два уровня (две ступени) резкого повышения кажущегося заряда и тока ЧР: первая ступень — уровня $q_{чр} = 10^{-12}$ Кл, вторая — до $q_{чр} = 10^{-9} \div 10^{-8}$ Кл и выше. Напряженность второй ступени соответствует напряженности критических ЧР.

4. В процессе ресурсных испытаний снижается кратковременная электрическая прочность пленок, в том числе за счет контактирования с пропитывающей жидкостью. Для некоторых типов полипропиленовой пленки это приводит к увеличению $\mathrm{tg}\,\delta$ пропитывающей жидкости.

5. Наиболее рациональной пропитывающей жидкостью для бумажно-пленочных конденсаторов на напряжение до 1 кВ является миксофлекс 1000, для бумажно-пленочных и пленочных конденсаторов на напряжения 1 кВ и выше целесообразно применять фенилксилилэтан, жарилек С101 или ДОН-3.

6. По результатам исследования характеристик ЧР и ресурсных испытаний определены допустимые рабочие напряженности в изоляции секций конденсаторов с пропиткой экологически безопасными жидкостями. Разработанные на основании полученных данных бумажно-пленочные конденсаторы имеют удельные характеристики на уровне лучших зарубежных аналогов.

[24.09.98]

Автор: ***Кучинский Георгий Станиславович*** *окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ЛПИ), ныне Санкт-Петербургского государственного технического университета (СПбГТУ) в 1947 г. В 1965 г. защитил докторскую диссертацию в ЛПИ на тему «Частичные разряды и срок службы высоковольтной бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа». Профессор кафедры «Инженерная электрофизика и техника высоких напряжений» СПбГТУ.*

Галахова Людмила Тимофеевна *окончила факультет радиоэлектроники и автоматики Московского института нефтехимической и газовой промышленности (ныне Академии нефтехимической и газовой промышленности) им. Губкина в 1965 г. В 1996 г. защитила кандидатскую диссертацию на тему «Электрофизические характеристики изоляции силовых конденсаторов промышленной частоты с пропиткой экологически безопасными жидкостями». Ведущий инженер компании «Объединенная энергия», Москва.*